

1803 プローブ車両による軌道の異常検出

学 [機] ○森 裕貴 (日本大学大学院)

正 [機] 網島 均 (日本大学)

正 [機] 松本 陽 (交通安全環境研究所)

正 [機] 水間 毅 (交通安全環境研究所)

Fault Detection of Railway Track Using Probe Vehicle

Hiroataka Mori, Graduate School of Nihon University, 1-2-1 Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba 275-8575

Hitoshi Tsunashima, Nihon University,

Akira Matsumoto, National Traffic Safety and Environment Laboratory, currently MLIT

Takeshi Mizuma, National Traffic Safety and Environment Laboratory

This paper describes the development and the verification of the "probe system" which estimates the track conditions without sensors on bogie. To detect the track conditions from the data which can be observed in the interior of a service vehicle, two methods have been proposed: the method to detect track irregularities using RMS of the lateral/vertical accelerations and the rolling of the vehicle body, and the method to detect rail corrugations from the interior noise using the windowed Fourier transform. The developed system has been installed onto the cab of a service vehicle to carry out a field test for the validation of the system. The results of comparison with the ground data show that the probe system can estimate effectively the amplitude of track irregularities, the grade of rail corrugations and its location.

Keywords: Railway, Diagnostics, Condition monitoring, Spectrum Analysis, Vibration, Noise

1. 緒言

車輪がレールで案内されて走行する鉄道にとって、軌道の安全管理は重要である。その状況を把握し、事故に至る前に補修していく予防保全が不可欠である。そのためには、軌道の状態を常時あるいは高頻度で監視することが望ましい。しかし、軌道検測車やレール探傷車などの検査用車両の走行により精密な軌道検査が可能になっているものの、コストや要員などの点から走行頻度は非常に制限される。さらに地方鉄道では、施設の経年劣化が著しい一方で、費用の確保や技術力の維持が難しく、十分な検査が行えない事業者も少なくない。

このような問題に対して、簡便な方法により軌道状態の常時監視と診断が可能になれば、適切な保全時期、保全内容の計画によって、より確実な予防保全の実現が期待できる。常時監視を実現する一つの方法として、一般の車両に簡単なセンサ類を付加することにより、営業運転を行いながら軌道の状態診断を行う方法が考えられる(図1)。このような車両をプローブ車両と呼ぶ^{(1),(2)}。このプローブ車両が実現すれば、状態監視にもとづく新しい保安形態を確立できると考えられる。

このような保安形態を実現するには、異常を的確に検出することが重要であり、第一の課題である。センサなどにより状態を計測し、得られる情報から特徴を抽出、異常を判別する方法が必要となる。著者らは、ウェーブレット変換や窓フーリエ変換を用いて、台車および客室内で測定した振動加速度や騒音から、レール波状摩耗を検出する方法について提案した⁽³⁾。本論文では、車両の振動による軌道変

位の検出および車内騒音による波状摩耗の検出の方法について提案する。また、車室内での簡易な計測により軌道の状態診断が可能で、持ち運びが容易である可搬型プローブ装置を構築し⁽⁴⁾、実際の営業路線において実車走行実験を行い、その有効性を検証する。

2. 車体振動による軌道変位の検出

レールの長手方向の形状の変化を軌道変位といい、車両の振動による乗り心地の悪化とともに脱線の危険性を発生させ、また著大な荷重により軌道を劣化させるため、最も重要な検査項目の一つである。

軌道状態の変化を監視する目的では、軌道変位の絶対値が得られなくても、その傾向を得るには車体振動の大きさは有効である。このような観点から、本研究では、振動の振幅が軌道変位を示す指標になり得ると考え、RMS (Root Mean Square)値を用いる。

軌道状態と位置との関係を得るためには、短時間の RMS を求める必要がある。測定値 $x(t)$ のうちの短い時間区間における RMS $x_{rms}(t)$ を次式で定義する。

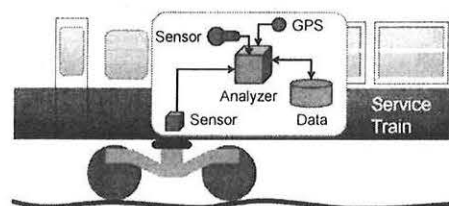


Fig.1 Probe Vehicle System

$$x_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\tau=1}^{t+N-1} x(\tau)^2} \quad (1)$$

レールの上下方向の変形である高低変位、左右方向の変形である通り狂いを検出するために、上下・左右加速度を測定するほか、左右レールの高低差である水準変位を検出するために、ロール角を測定する。測定した上下加速度、左右加速度、ロール角についてそれぞれ $x_{rms}(t)$ を求める。

3. 車内騒音によるレール波状摩耗の検出

3.1 レール波状摩耗

レール波状摩耗は、レールの頭頂部が数 cm から十数 cm の周期で摩耗する現象で、特に急曲線部に発生するものが問題となっている⁽⁵⁾。波状摩耗が成長すると、著しい騒音や振動を引き起こしたり、軌道材料を損傷させたりする原因となるため、レールの研削や交換が必要となり、都市鉄道では軌道保守の重要な課題の一つとなっている。

3.2 検出方法

波状摩耗のような周波数の高い振動は、空気を伝搬し、騒音として捉えられる可能性がある。実際、車両が波状摩耗上を走行する際、独特の騒音が発生することが知られている。このことから、車内騒音から軌道異常を検出できれば、非接触の測定となり、既存の車両への導入がさらに容易になると考えられる。

波状摩耗は、レールの周期的な凹凸であることから、周波数情報から波状摩耗を検出する方法を提案する⁽⁴⁾。車内騒音データに窓フーリエ変換を行い、スペクトルから波状摩耗のピークを探索、時間変化を評価する。120~240 Hz の周波数帯域の最大値を波状摩耗のピークとした。

4. プローブシステムの構成

4.1 システム構成

図 2 にプローブシステムの構成図を示す。波状摩耗を検出するための騒音計、軌道変位を検出するための加速度センサおよびレートジャイロ、位置を検出するための GPS 受信機、解析用のコンピュータ、各センサの信号をコンピュータに入力するアナログ入力ターミナルで構成される⁽⁶⁾。

各センサから出力される信号は、アナログ入力ターミナルによりデジタル信号に変換され、コンピュータに入力さ

れる。また、GPS 受信機により求められる位置情報がコンピュータに入力される。コンピュータに組み込まれた位置推定・マップ表示ソフトは、GPS 受信機による位置情報にもとづいて、路線上の位置を求め、画面の地図上の現在位置を逐次表示する。軌道異常検出ソフトは、位置推定・マップ表示ソフトによる位置と GPS 受信機による速度情報に対して、加速度センサによる加速度信号を用いて補正を行うとともに、各センサからの信号を信号処理することにより軌道状態を逐次推定する。位置推定・マップ表示ソフトは、軌道異常検出ソフトによる軌道状態を画面の地図上に示す。信号処理されたデータは、オフラインにより解析するために、ハードディスクドライブに記録される。

4.2 軌道異常の検出方法

4.2.1 車体振動による軌道変位の検出

加速度センサおよびレートジャイロから窓幅分の信号を取得、その RMS を逐次計算した。窓幅は、次項の波状摩耗の検出と処理の一部を統合するために、0.512s とした。

4.2.2 騒音による波状摩耗の検出

騒音計から窓幅分の信号を取得して、高速フーリエ変換 (FFT) とスペクトルの平滑化、波状摩耗のピークの検出を逐次行うことにより、オンラインで波状摩耗を推定するようにした。窓幅は、時間分解能を高くするために極力小さく、かつ波状摩耗特有のスペクトルが観測できる程度に調整し、0.512 s とした。窓関数には、周波数分解能の比較的良好な Hanning 窓を用いた。

4.3 列車位置・速度の補正方法

4.3.1 空間的補正

GPS による測位データは誤差を生じるため、マップマッチング補正を行う。あらかじめ路線形状のデータを作成しておき、GPS の測位座標から直近の路線上に補正する。補正した座標を、路線の基点からの距離 x_0 に換算する。

4.3.2 時間的補正

GPS の測位情報は、1 秒間隔で得られる。その間の位置を、速度 $v(t)$ の積分値を用いて推定する。時刻 $t = t_g$ で GPS により求めた距離 $x(t_g)$ から現在時刻 $t = t_c$ の距離 $x(t_c)$ を次式より求める。

$$x(t_c) = x(t_g) + \sum_{t=t_g-2}^{t_c} a(t) \Delta t \quad (2)$$

ここで、速度 $v(t)$ についても同様に予測する必要がある。

GPS の速度情報も 1 秒間隔で得られるため、その間の速度を、加速度センサによる前後加速度 $a(t)$ の積分値を用いて推定する。ただし、GPS の速度情報は 2 秒程度の時間遅れを持つため、時刻 $t = t_g$ で GPS により得られた速度 $v(t_g)$ から現在時刻 $t = t_c$ の速度 $v(t_c)$ を次式より求める。

$$v(t_c) = v(t_g) + \sum_{t=t_g-2}^{t_c} a(t) \Delta t \quad (3)$$

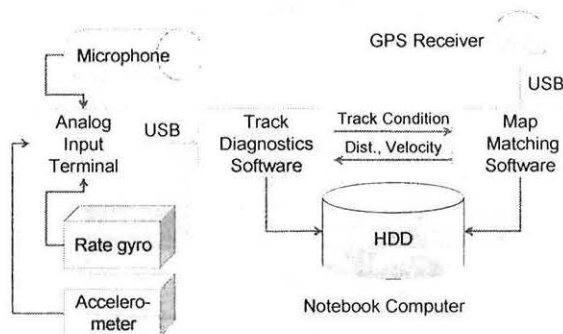


Fig.2 Configuration of Probe System

4.4 可搬型プローブ装置の構築

プローブシステムを実現するために構築した、可搬型プローブ装置の内部を図3に示す。センサ類を1つの箱に収め、解析用コンピュータと一体の構成にすることにより、運転直前の設置、運転後の取り外しを容易に行えるようにした。GPS受信機は、受信状態の良い位置にマグネットにより固定できるようにした。

5. 営業路線における走行試験

5.1 試験方法

構築したプローブ装置を営業車両の運転台の近くに設置した。GPS受信機を窓枠に固定し、営業路線を走行した。図4に実験の状況を示す。

5.2 試験結果

図5は、測定した騒音、加速度、ロール角速度の原信号と、それを信号処理して求めた騒音スペクトルピーク、加速度とロール角速度のRMSを表示した結果である。また、図6は、検出された軌道異常と、現在位置を地図上にリアルタイムで表示した結果である。軌道異常検出処理による評価値にしきい値を設定し、注意、警告の表示を行い、軌道異常の内容と程度の表示を行う。

5.2.1 軌道変位

実車走行実験において、比較的大きな車体上下加速度RMS値を計測した区間を図7に示す。縦軸は車体上下加速度RMS値で、横軸はGPSと前後加速度から推定したキロ程である。車体上下加速度RMS値の大きい箇所(図7の○で囲われた部分)において、レールの異常が発生していると考えられる。そこで、徒歩による現地調査を行った。その結果、異常値が発生していた部分では、道床碎石に土が混入し、道床とレールの間に隙間が発生していた(図8)。このような状態は「浮き枕木」と呼ばれ、浮き枕木が発生すると車両が通過する際、レールの沈下によりたわみが発生、安全上大きな問題となることが知られている。

現地調査の結果、車体上下加速度RMS値が大きいほぼ全ての箇所ではレールの異常が発見されたことから、車体振動加速度のRMSにより軌道異常の発生箇所を特定できることがわかった。

5.2.2 波状摩耗

波状摩耗の成長を見るために、半年の期間をにおいて2回の実験を行った。1回目の車内騒音の測定結果を図9(a)に、2回目の測定結果を図9(b)に示す。半径400m以下の急曲線を網掛けで示す。車内騒音の振幅からは、網掛けの曲線区間における有意な変化は確認できない。

車内騒音のスペクトルピークを図10に示す。図10では、波状摩耗に起因しないスパイク状のノイズを除去するために、3秒間のメディアンフィルタをオフラインで施した。網掛けの曲線区間で高い値になっていることが明瞭に確認できる。また、2回目の結果において急曲線部でRMSが増大

しており、波状摩耗が成長していることが予想できる。

以上の結果より、車内騒音により波状摩耗の発生位置を特定し、その成長度合が予想できることを示している。

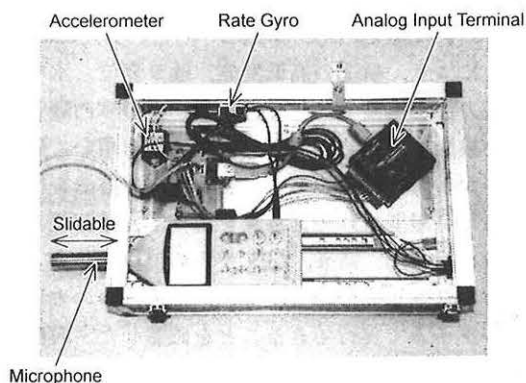


Fig.3 Interior View of Probe System

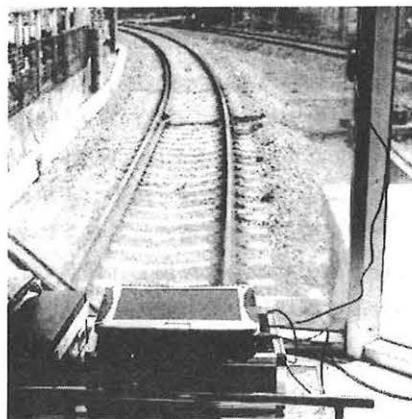


Fig.4 Field Test

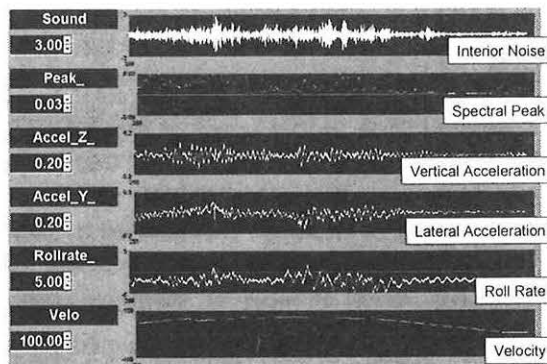


Fig.5 Real Time Monitoring of Track Condition

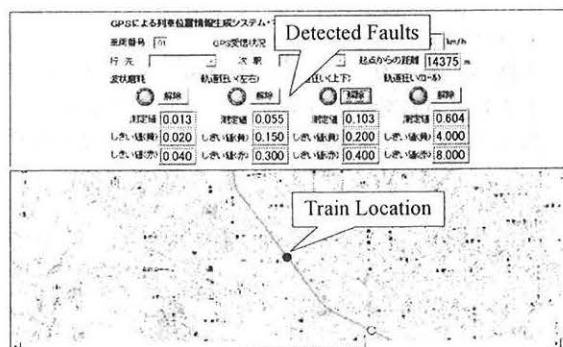


Fig.6 Real Time Fault Detection of Track

5. 結 言

本論文では、車両振動による軌道変位の検出および車内騒音による波状摩耗の検出の方法を提案し、実用に向けたプローブ装置の構築を行った。その結果を以下にまとめる。

車体の上下加速度、左右加速度、ロール角の RMS 値を求めることにより、軌道の高低変位、通り変位、水準変位を検出する方法を提案した。走行する車両の車内騒音から波状摩耗を検出するため、窓フーリエ変換を用いて騒音のスペクトルから波状摩耗のピークを検出する方法を提案した。

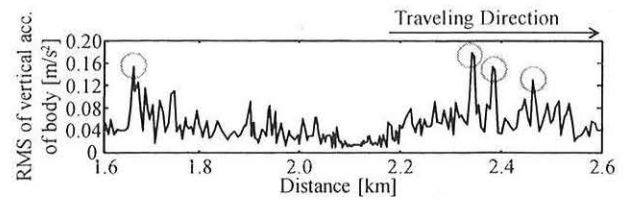
提案した可搬型プローブ装置を構築、営業路線において走行試験を行った。結果、GPS からの位置の推定と、各センサからの軌道状態の推定を行い、地図上への表示、記録がリアルタイムで実行できることを確認した。可搬型プローブ装置で得られた車内騒音のスペクトルピークは、波状摩耗が発生している急曲線で高い値を示し、波状摩耗の発生位置を明確に特定できることを示した。可搬型プローブ装置で得られた車体動揺の RMS 値と徒歩による現地調査を行った結果、車体動揺の RMS 値から軌道変位を検出できる可能性を示し、可搬型プローブ装置の有用性を示した。

本研究で提案したプローブ装置は、保全に必要な情報を 1 回の走行により得ることは困難である。実用に向けては、可搬型プローブ装置により蓄積される日々のデータから、統計的処理などにより傾向を算出し、保全の必要性を提示する方法が今後の課題になると考えられる。これが可能になれば、適切な保全時期や保全内容の計画に活用できることが期待される。

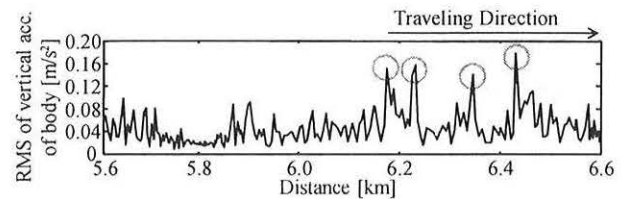
本研究はシーズ発掘試験「04-094：レール状態診断装置」（2009）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) H. Tsunashima, A. Matsumoto, H. Nakamura and H. Yamashita : Fundamental Studies on Development of Probe-Vehicle System for Advanced Railway Inspection, The 13th Transportation and Logistics Conference 2004 pp. 241-242, 2004
- 2) H. Tsunashima, A. Matsumoto, T. Mizuma and H. Nakamura : Condition Monitoring of Railway System by "Probe Vehicle" Technology, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 61, No. 2, pp. 98-104, 2007
- 3) 小島崇, 綱島均, 松本陽, 緒方正剛, 車上測定データによる軌道の異常検出 (第 1 報, レール波状摩耗の検出), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 720, No. 72, pp. 2447-2454, 2006
- 4) 小島崇, 綱島均, 松本陽, 水間毅, 車上測定データによる軌道の異常検出 (第 2 報, プローブシステムの開発と検証), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 754, No. 75, pp.1798-1805, 2009
- 5) A. Matsumoto et al. : Formation mechanism and countermeasures of rail corrugation on curved track, Wear, Vol. 253, No. 1, pp. 178-184, 2002
- 6) H. Tsunashima, T. Kojima, A. Matsumoto and T. Mizuma : Condition monitoring of railway track using in-service vehicle, Japanese Railway Engineering, No. 161, 2008



(a) RMS of Vertical Acceleration of Body (1.6km ~ 2.6km)

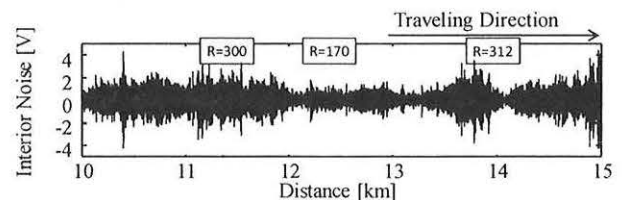


(b) RMS of Vertical Acceleration of Body (5.2km ~ 6.2km)

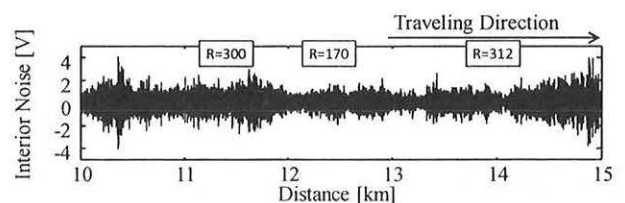
Fig.7 RMS of Vertical Acceleration of Body



Fig.8 Loose Sleeper (2.3km)



(a) Interior Noise (1st)



(b) Interior Noise (2nd)

Fig.9 The comparison of Interior Noise

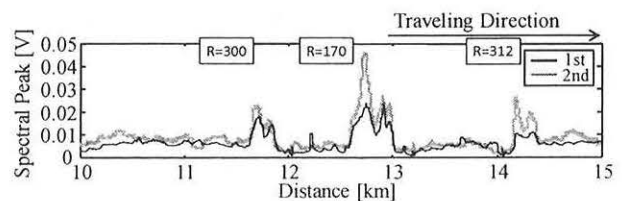


Fig.10 Spectral Peak of Interior Noise